

TUGAS AKHIR

**LAJU KOROSI TULANGAN PADA BETON BERBAHAN
PASIR SLAG NIKEL DAN FLY ASH**

***CORROSION ACCELERATED OF REBAR EMBEDDED IN
CONCRETE WITH NICKEL SLAG SAND AND FLY ASH***

**INDRAWANSYAH FERNANDA ARAS
D111 16 006**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2020**



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL**

Jl. Poros Malino km. 6 Bontomarannu, 92172, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan
☒ <http://civil.unhas.ac.id> ☒ civil@eng.unhas.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Judul Tugas Akhir

**LAJU KOROSI TULANGAN PADA BETON BERBAHAN PASIR SLAG
NIKEL DAN FLY ASH**

Disusun oleh

INDRAWANSYAH FERNANDA ARAS

D111 16 006

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT

NIP: 197206192000122001

Dr. M. Asad Abdurrahman, ST, M.Eng.PM

NIP: 197303061998021001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Sipil



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, MEng

NIP: 196805292001121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, Indrawansyah Fernanda Aras, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Laju Korosi Tulangan Pada Beton Berbahan Pasir Slag Nikel dan Fly ash**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, 17 April 2020

Yang membuat pernyataan,



Indrawansyah Fernanda aras

NIM. D111 16 006

KATA PENGANTAR

Tiada kata yang pantas kita ucapkan dari lidah yang tidak bertulang ini selain kata alhamdulillahirabbilalamin sebagai bukti ungkapan rasa syukur kita atas segala nikmat tuhan yang maha esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan Tugas Akhir sebagai salah satu persyaratan akademik untuk memperoleh gelar sarjana S1 pada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin Makassar, dengan judul **“Laju Korosi Tulangan Pada Beton Berbahan Pasir Slag Nikel dan Fly Ash”**.

Dengan selesainya penulisan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya atas doa, bimbingan, bantuan, dorongan dan partisipasi kepada:

1. Keluarga yang tercinta, Bapak **H. Muh Arsyad** dan Ibu **Hj.Salmiah K.** adinda **Adrian Alga Sakti** dan **Nurul Indira Agustin** atas segala doa dan dukungan selama perkuliahan hingga melewati seluruh rangkaian ujian.
2. Yang Terhormat, Bapak **Prof. Dr. Ir. H. M. Arsyad Thaha, MT.** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Yang Terhormat, Bapak **Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng.**, dan Bapak **Dr.Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.**, selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak **Dr.Eng. Arwin Amiruddin ST., M.Eng.**, selaku kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Ibu **Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty ST., MT.**, dan Bapak **Dr.M.Asad Abdurrahman,ST,M.Eng.PM.** selaku Pembimbing I dan Pembimbing II yang selalu memberikan bimbingan dan bantuannya selama penelitian hingga laporan Tugas Akhir ini selesai.
6. Bapak **Dr.Eng. Muhammad Akbar Caronge, ST, M.Eng** selaku dosen pendamping yang selama ini telah memberikan banyak ilmu kepada kami mengenai pengujian ini
7. Bapak **Syamsul** selaku S3 kami, yang mendampingi selama pengujian ini dan kami sering bertukar pikiran terkait pengujian ini.
8. Seluruh Dosen yang telah membantu penulis selama mengikuti perkuliahan di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
9. Kepada **Teguh Priono** selaku partner saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini, banyak hal yang kami lalui bersama meskipun terkadang kami sering selisih paham, tapi hal itu kami bisa lalui bersama sampai saat ini.
10. Dan untuk **Zulfadly** saudara seperjuangan saya, yang selaku mendampingi menguji, teman curhat, teman mengurus di HMS FT-UH, semoga kami bisa selalu sama-sama untuk meraih mimpi kami.

11. Seluruh Staff dan Karyawan Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.
12. Asisten Laboratorium Struktur dan Bahan, **Mus, Rifqi, Erli** dan **Halima**, yang selalu saling membantu dan memberikan dorongan dalam mengarungi kehidupan kampus.
13. **Teman-teman Angkatan 2016 (Patron 2017)**, yang selama ini bersama-sama menjalani kehidupan kampus dan memberikan pengalaman yang tidak akan terlupakan.
14. Semua pihak yang telah membantu penulis baik dalam penelitian maupun selama mengarungi kehidupan kampus, yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa setiap karya manusia pasti memiliki banyak kekurangan dan mengharapkan partisipasi pembaca untuk memberikan kritik ataupun saran yang berguna untuk penyempurnaan ataupun pengembangan penelitian ini di masa yang akan datang.

Akhir kata, semoga seluruh ilmu yang diperoleh dapat dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya dan dapat membawa manfaat bagi semua orang. Semoga seluruh dukungan dan doa yang telah diberikan mendapatkan balasan oleh Allah SWT dan membawa kami menjadi manusia yang lebih baik kedepannya.

Gowa, 17 April 2020

Indrawansyah Fernanda Aras
NIM. D111 16 006

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung laju korosi dari tulangan yang dibenamkan dalam beton dengan material pasir slag nikel dan fly ash pada berbagai komposisi campuran beton. Benda uji yang digunakan adalah silinder beton dengan diameter 100 mm, yang dibenamkan tulangan diameter 16 mm ditengah beton. Variasi komposisi beton yang digunakan adalah OPC-Pasir, OPC-GNS50; FA15-GNS50 dan FA30-GNS 50 dengan faktor air semen 45%. Benda uji tersebut di rendam dalam larutan NaCl 3%. Pengujian laju korosi dilakukan mulai hari ke 28 dari umur perendaman benda uji sampai kondisi stabil setelah benda uji retak. Hasil menunjukkan bahwa laju korosi pada tulangan beton untuk setiap variasi (OPC-PASIR, FA15-GNS50, FA30-GNS50 dan OPC-GNS50, memiliki karakteristik yang berbeda-beda, dimana beton OPC-PASIR membutuhkan waktu yang lebih singkat hingga terjadi retak awal yaitu sekitar 143,23 jam, menandakan korosi. Selanjutnya beton FA15-GNS50 butuh waktu 174,41 jam, beton FA30-GNS50 dan OPC-GNS50 membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mengalami retak awal yaitu 189,51 jam. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan pasir slag nikel dan fly ash pada campuran beton dapat memperlambat proses korosi pada beton bertulang dan mampu memberikan daya tahan yang lebih baik terhadap korosi. Dari peninjauan lebar retak, nampak bahwa lebar retak OPC-PASIR lebih besar dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu lebar retak maksimum 0.9 mm. Hal ini membuktikan bahwa ketahanan Beton Normal (OPC-PASIR) terhadap korosi lebih rendah.

Kata Kunci: Pasir Slag Nikel, Abu Terbang, Tingkat Korosi, Kekuatan Beton, Lebar retak.

ABSTRACT

This study aims to calculate the corrosion rate of reinforcement which embedded in concrete containing nickel slag sand and fly ash in various compositions. The specimen used was a concrete cylinder with a diameter of 100 mm and rebar of 16 mm which was embedded in the center of the cylinder. Variations in the composition of concrete used are OPC-Sand, OPC-GNS50; FA15-GNS50 and FA30-GNS50 with a cement water ratio of 45%. The specimens were immersed in 3% NaCl solution during testing period. Corrosion rate testing is carried out starting on 28 days after demolding until the specimen in steady state condition, and the specimen crack occurred. The results show that the corrosion rate of concrete reinforcement for each variation (OPC-Sand, FA15-GNS50, FA30-GNS50 and OPC-GNS50, has different characteristics, where concrete OPC-Sand requires a shorter time until initial cracking occurs which is about 143.23 hours, indicating corrosion. Furthermore, FA15-GNS50 concrete takes 174.41 hours, FA30-GNS50 and OPC-GNS50 concrete takes more time for initial crack of 189.51 hours. This proves that the use of sand nickel slag and fly ash in concrete mixed can delay the corrosion process in reinforced concrete and can provide better resistance to corrosion. From the view of the crack width, it appears that the OPC-Sand crack width is greater than other variations with maximum crack width of 0.9 mm. This proves that the resistance of Normal Concrete (OPC-Sand) to corrosion is lower.

Keywords: Nickel Slag Sand, Fly Ash, Corrosion Rate, Concrete Strength, Crack Width.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat penelitian	4
E. Batasan Masalah	5
F. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Beton Bertulang	7
B. Agregat	8
B.1. Agregat Halus	8
B.2. Agregat Kasar	10
C. Semen	11
D. Air	12

E. Slag Nikel.....	12
F. Sifat Mekanik Beton.....	15
G. Korosi.....	17
G.1. Passivasi.....	19
G.2 Diagram Pourbaix..	20
H. Baja Tulangan.....	21
I. Korosi Baja Tulangan dalam Beton.....	25
J. Akselerasi Korosi	26
K. Faktor Penyebab Korosi pada Baja Tulangan dalam Beton	28
K.1. Depasivasi.....	28
K.2. Penguraian CO ₂ (Karbonasi).....	28
K.3. Serangan Sulfat.....	29
K.4. Efek Ion Klorida	30
K.5. Efek Oksigen	32
L. Keretakan Beton Akibat Korosi.....	33
M. Peranan Slag Nikel Pada Laju Korosi Tulangan	35
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	36
A. Kerangka Prosedur Penelitian	36
B. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	37
C. Alat dan Bahan Penelitian.....	38
D. Prosedur Penelitian.....	38
D.1 Komposisi Campuran Beton.....	38

D.2 Pembuatan Benda Uji	39
D.3 Jumlah Benda Uji	40
D.4 Perawatan (Curing) Benda Uji.....	41
D.5 Pengujian Benda Uji.....	41
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
A. Karakteristik Material	43
B. Kuat Tekan.....	44
C. Proses Akselerasi Korosi.	45
D. Hubungan Arus Listrik dan Waktu.....	46
E. Waktu Retak Awal.....	51
F. Pola Retak Setelah Akselerasi Korosi.....	52
G. Lebar Retak Setelah Akselerasi Korosi.....	55
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	56
A. KESIMPULAN.....	56
B. SARAN	57
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram Persentase Kerusakan Beton Akibat Proses Fisik Dan Kimiawi	7
Gambar 2. Proses Pembuatan Nikel	10
Gambar 3. Lokasi Tambang Nikel Milik PT.Vale Indonesia	14
Gambar 4. Skematik Sel Korosi dalam Suatu Sistem Sederhana	18
Gambar 5. Skematik Perilaku Polarisasi Aktif-Pasif	19
Gambar 6. Kondisi Teoritis Dari Korosi, Imun, Pasif Dari Besi	21
Gambar 7. Baja-Baja Tulangan Yang Berprofil.....	23
Gambar 8. Bentuk Baja Tulangan Sirip Beton	24
Gambar 9. Proses Korosi Pada Permukaan Baja.....	25
Gambar 10. Lapisan Pasif Baja Tulangan Dalam Beton Rusak.	26
Gambar 11. Skema Penelitian Akselerasi Korosi	27
Gambar 12. Degradasi Korosi Baja Tulangan Dalam Beton.....	28
Gambar 13. Efek Karbonisasi Pada Korosi Baja Tulangan Dalam Beton.	29
Gambar 14. Korosi yang Disebabkan Penetrasi Ion Klorida dalam Beton.	30
Gambar 15. Pengaruh Konsentrasi Garam Terhadap Laju Korosi.	31
Gambar 16. Model Korosi Untuk Baja Tulangan Dalam Beton.....	32
Gambar 17. Perbandingan Lebar Retak Yang Diizinkan.	34
Gambar 18. Perbandingan Lebar Retak Yang Diizinkan	34
Gambar 19. Kerangka Prosedur Penelitian.	36
Gambar 20. Mix Campuran Beton	39
Gambar 21. Dimensi Benda Uji.	40
Gambar 22. Benda Uji Dalam Mould.	40

Gambar 23. Curing Air.....	41
Gambar 24. Akselerasi Korosi	42
Gambar 25. Skema Alat Akselerasi	42
Gambar 26. Hasil Pengujian Slump.....	45
Gambar 27. Proses Akselerasi Korosi Di Laboratorium	45
Gambar 28. Hubungan Arus Listrik Dan Waktu untuk OPC-PASIR	46
Gambar 29. Hubungan Arus Listrik Dan Waktu untuk FA15-GNS50.....	47
Gambar 30. Hubungan Arus Listrik Dan Waktu untuk FA30-GNS50.....	48
Gambar 31. Hubungan Arus Listrik Dan Waktu untuk OPC-GNS50	49
Gambar 32. Waktu Retak Awal Untuk Tiap Variasi	51
Gambar 33. Pola Retak Sampel OPC-PASIR	53
Gambar 34. Pola Retak Sampel FA15-GNS50.....	53
Gambar 35. Pola Retak Sampel FA30-GNS50.....	54
Gambar 36. Pola Retak Sampel OPC - GNS50..	54

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Syarat - syarat gradasi agregat halus	10
Tabel 2. Syarat - syarat gradasi agregat kasar	11
Tabel 3. Komposisi Kimia Terak Nikel	15
Tabel 4. Sifat Mekanis Baja Tulangan Beton	23
Tabel 5. Komposisi campuran Beton dengan FAS 45%	39
Tabel 6. Jumlah benda uji dengan 0.45 pada umur 28 hari	41
Tabel 7. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus	43
Tabel 8. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar (batu pecah)	44
Tabel 9. Data Nilai Slump Test dan Kuat Tekan 28 hari	44
Tabel 10. Proses korosi terhadap waktu dengan curing air untuk OPC-PASIR.	46
Tabel 11. Proses korosi terhadap waktu dengan curing air untuk FA15-GNS50.	47
Tabel 12. Proses korosi terhadap waktu dengan curing air untuk FA30-GNS50.	48
Tabel 13. Proses korosi terhadap waktu dengan curing air untuk FA30-GNS50.	49
Tabel 14. Pengaruh curing terhadap waktu retak awal	51
Tabel 15. Lebar retak setelah akselerasi korosi	55

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia terdiri atas ribuan pulau dan terdapat gugusan pulau-pulau terpencil serta jauh dan wilayah di pesisir pantai yang lebih rendah dari permukaan air laut (*low land*) dengan kondisi kurang sumber air tawar atau air bersih. Oleh karena itu Negara Indonesia dikatakan sebagai Negara kepulauan dalam arti bahwa di setiap titik lokasi, terdapat bangunan-bangunan yang terletak di daerah pantai seperti bangunan dermaga/pelabuhan, talut dan bangunan lain yang sering kita temukan sesuai dengan kebutuhan aktivitas masyarakat. Kondisi wilayah Indonesia yang seperti ini merupakan kondisi lingkungan yang korosi dan rawan terhadap serangan korosi.

Beton merupakan material yang umum digunakan dalam dunia konstruksi yang memiliki karakteristik tegangan hancur tekan yang tinggi dan diimbangi dengan tegangan hancur tarik yang rendah. Untuk memberikan kekuatan tarik pada beton maka digunakanlah tulangan baja pada bagian dalam beton, namun salah satu yang mengakibatkan turunnya kekuatan tarik dari baja tulangan dan kelekatan pada selimut beton ialah korosi. Korosi pada penulangan beton bertulang merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan dan kegagalan awal dari konstruksi beton bertulang. Persyaratan dalam struktur beton bertulang salah satu diantaranya adalah dengan adanya lekatan antara baja tulangan dan beton.

Beton yang baik memiliki beberapa sifat dasar, antara lain memenuhi kekuatanyang direncanakan dan campuran betonnya tidak diperkenangkan untuk mangalami segregasi atau pemisahan selama pengecoran. Bahan dasar pembentuk beton terdiri dari semen, agregat kasar maupun agregat halus, air dan bahan tambahan lainnya. Dalam buku *Paul N,Antoni (2007)* yang secara volumentris beton diisi oleh agregat sebanyak 61-76%. Jadi agregat punya peranan penting sebagai material pengisi beton. Di banyak negara terdapat kelangkaan agregat alam yang cocok untuk konstruksi, sementara di negara lain terjadi peningkatan konsumsi agregat karena permintaan industri konstruksi semakin besar

Oleh karena itu perlu dipikirkan bagaimana cara mengembangkan alternatif pengganti material yang dapat digunakan sebagai salah satu material dalam pembuatan beton. Alternatif yang dapat diambil yaitu dengan memanfaatkan kembali limbah dari industri yang memungkinkan dapat digunakan sebagai salah satu material penyusun beton. Salah satu alternatif material yang bisa digunakan untuk pengganti pada material perbaikan/pemeliharaan yakni pemanfaatan *by product* industri pengolahan bahan logam yakni terak (slag) nikel. Jika dilihat secara visual, bentuk fisik dari terak nikel ini menyerupai agregat baik yang halus menyerupai pasir maupun yang kasar menyerupai kerikil yang biasa digunakan untuk agregat dalam campuran beton (Mustika, 2015).

Terak nikel merupakan *by product* yang dihasilkan dalam proses produksi nikel. Terak nikel yang dihasilkan dalam jumlah yang banyak akan berdampak negatif pada lingkungan ketika dibuang atau disimpan dalam periode waktu yang lama (Mombeli et al., 2014). Begitupula material *by*

product terak nikel dikategorikan sebagai material yang memiliki potensi limbah B3 dari sumber spesifik khusus dengan kategori bahaya 2 sebagaimana dalam Peraturan Pemerintah PP No. 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) (Departemen KLH, 2015).

Terak nikel adalah salah satu jenis sisa dari proses industri yaitu akibat proses peleburan bijih nikel setelah melalui proses pembakaran dan penyaringan. Satu lokasi pertambangan di Soroako, Sulawesi Selatan, Indonesia (PT. VALE) memproduksi 3000 ton terak nikel dalam proses penyulingan nikel dalam bentuk padat setiap minggu dan menghasilkan lebih dari 2,5 juta ton terak nikel setiap tahunnya. Saat ini, sebagian besar bahan hasil produk ini dibuang di tempat pembuangan sampah, sehingga mengancam lingkungan dan menjadi manajemen produk limbah utama.

Oleh karena itu penggunaan terak (slag) nikel sebagai material dalam campuran beton dapat memberikan keuntungan diantaranya adalah pemenuhan agregat dalam pembuatan beton, menghemat biaya produksi, mengurangi limbah serta mengurangi pencemaran lingkungan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa *by product* terak industri pengolahan logam dapat dipergunakan sebagai alternatif pengganti material agregat pada konstruksi beton antara lain terak tembaga sebagaimana dalam penelitian Brinda & Nagan (2011) dan Song (2014). Terak besi dalam penelitian Sabat (1998) dan Gunawan (2011). Terak nikel dalam penelitian Akiyama dan Yamamoto (1986), Permadi (1988), Sugiri (2005), Taniwijaya dan Hardjito (2007) serta beberapa jenis penelitian terak logam lainnya.

Dalam penelitian ini, limbah terak (slag) nikel digunakan sebagai pengganti agregat halus dengan variasi kandungan terak (slag) nikel yakni 50 % dan benda uji dalam kondisi normal atau tanpa terak nikel yang ditinjau dari laju korosi tulangan pada beton. Sesuai yang dijelaskan terkait dengan definisi beton yang pada umumnya lemah terhadap Tarik maka dari itu ditambahkan tulangan untuk mendukung kekuatan Tarik pada beton tersebut. Namun Salah satu yang menjadi kendala untuk setiap struktur beton bertulang adalah korosi, berangkat dari permasalahan yang ada kami akan mencoba meneliti **Laju Korosi Tulangan Pada Beton Berbahan Pasir Slag Nikel dan Fly ash.**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dapat dirumuskan masalah yaitu bagaimana laju korosi tulangan dalam beton berbahan pasir slag nikel dan fly ash dengan metode akselerasi.

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi laju korosi tulangan dalam beton berbahan pasir slag nikel dan fly ash berdasarkan nilai *half- cell potential* dengan metode akselerasi.

D. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dalam mengembangkan penelitian terkait dengan kualitas campuran pada beton bertulang yang dapat mempengaruhi proses korosi dan untuk mengetahui karakteristik beton bertulang dengan menggunakan pasir slag nikel.

E. Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan sesuai dengan sasaran yang ingin dicapai, maka penelitian ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

- Menggunakan semen Portland tipe I (*Ordinary Portland Cement*).
- Menggunakan terak (slag) Nikel sebagai pengganti sebagian pasir dan fly ash sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton.
- Rasio air semen yang digunakan adalah 45 %.
- Curing dengan cara direndam dalam air tawar dengan suhu ruangan konstan 20 °kelembaban 60% C dengan
- Uji laju korosi dilakukan setelah proses curing air 28 hari.

F. Sistematika Penulisan

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu: Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Berikut ini merupakan rincian secara umum mengenai kandungan dari kelima bab tersebut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan hal-hal mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan yang berisi tentang gambaran secara garis besar mengenai hal-hal yang dibahas dalam bab-bab berikutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori yang digunakan sebagai landasan atau acuan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai tahapan, persiapan alat dan bahan, cara penelitian serta uraian tentang pelaksanaan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini merupakan penjabaran dari hasil-hasil pengujian yang menyajikan data penelitian dan membahas analisis dari data tersebut, untuk mencapai hasil dari penelitian.

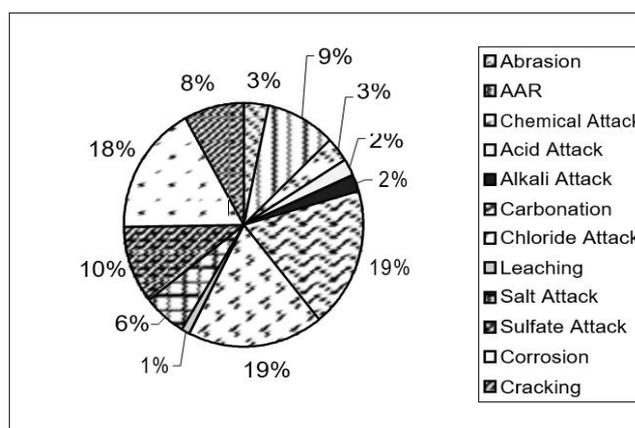
BAB V PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan singkat mengenai analisa hasil yang diperoleh saat penelitian yang disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Beton Bertulang

Bangunan dengan menggunakan beton bertulang merupakan bangunan yang sangat lazim digunakan oleh masyarakat pada umumnya. Demikian pula penggunaan bangunan berstruktur beton bertulang banyak digunakan pada daerah tepi pantai tanpa perlakuan khusus. Dengan terletaknya bangunan-bangunan tersebut pada lingkungan korosif maka perlu diperhitungkan perlemahan kekuatan struktur bangunan tersebut yang pada akhirnya akan menentukan masa layan dari bangunan tersebut. Basheer (1996) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa dari hasil review-nya pada sebanyak lebih dari 400 dokumen tentang kerusakan beton maka terindikasikan kerusakan tersebut diakibatkan oleh mekanisme fisik dan kimiawi. Dan hal ini dapat dikategorikan seperti dalam diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Persentase Kerusakan Beton Akibat Proses Fisik dan Kimiawi (Basheer, P. A. M, 1996).

Kerusakan struktur bangunan dalam hal ini struktur beton bertulang

akibat proses kimiawi berdasarkan data hasil review Basheer (1996) sekitar 77% dari data kerusakan struktur beton. Dan hal ini merupakan faktor yang menyebabkan kerusakan yang sangat digunakan dilapangan pada berbagai lingkungan korosif (Atur P. N. Siregar,2006).

B. Agregat

Dalam SNI T-15-1991-03, agregat didefinisikan sebagai material granular misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama- sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton semen hidrolik atau adukan. Pada beton semen biasanya volume agregat yang digunakan adalah 65- 75% dari volume total beton, sehingga kondisi agregat yang digunakan sangat berpengaruh pada karakteristik beton. Agregat bersifat inert pada beton dan mempunyai tiga fungsi utama yaitu :

- Sebagai material pengisi yang relatif lebih murah dari semen.
- Sebagai material padat yang tahan terhadap beban yang bekerja, abrasi, perkolasi air dan pengaruh cuaca.
- Mengurangi kembang-susut dari pasta semen.

Berdasarkan ukurannya, agregat dibedakan menjadi :

B.1. Agregat Halus (*Fine Aggregate*)

Merupakan pengisi yang berupa pasir. Ukurannya bervariasi antara ukuran No.4 dan No.100 saringan standar amerika. Agregat halus yang baik harus bebas dari bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No.100 atau bahan bahan lain yang dapat merusak campuran beton. Variasi ukuran dalam suatu campuran harus mempunyai gradasi yang

baik, yang sesuai dengan standar analisis saringan dari ASTM (*American Society of Testing and Materials*). Untuk beton penahan radiasi, serbuk baja halus dan serbuk besi pecah digunakan sebagai agregat halus (Edward G. Nawy, 1998)

Persyaratan agregat halus secara umum menurut SNI 03-6821-2002 adalah sebagai berikut:

1. Agregat halus terdiri dari butir-butir tajam dan keras.
2. Butir-butir halus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca. Sifat kekal agregat halus dapat di uji dengan larutan jenuh garam. Jika dipakai natrium sulfat maksimum bagian yang hancur adalah 10% berat. Sedangkan jika dipakai magnesium sulfat.
3. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (terhadap berat kering), jika kadar lumpur melampaui 5% maka pasir harus di cuci.

Pasir dapat diperoleh dari dalam tanah, pada dasar sungai, atau dari tepi laut. Oleh karena itu pasir digolongkan menjadi 3 macam:

- 1) Pasir galian, diperoleh dari permukaan tanah atau dengan cara menggali terlebih dahulu. Pasir ini biasanya tajam, bersudut, berpori dan bebas dari kandungan garam, tetapi harus dicuci terlebih dahulu.
- 2) Pasir sungai, diperoleh langsung dari dasar sungai, pada umumnya berbutir halus, bulat-bulat akibat gesekan. Karena daya lekat kurang dan butir-butirnya kecil, maka baik dipakai untuk memplester tembok.
- 3) Pasir laut, diambil dari pantai. Butirnya halus dan bulat karena gesekan. Pasir laut merupakan pasir paling jelek karena kotoran-kotorannya mengandung garam.

Tabel 1. Syarat - syarat gradasi agregat halus.

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos Saringan (%)
9,5	100
4,75	95 - 100
2,36	80 - 100
1,18	55 - 85
0,60	25 - 60
0,30	10 - 30
0,15	2 - 10

Sumber: *Concrete Technology, AM.Nevile & J.J Brooks*

B.2 Agregat Kasar (Coarse Aggregate)

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau berupa batu pecah yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran antara 5 mm sampai 40 mm. ukuran maksimum nominal agregat kasar menurut SNI 03-2847-2013 harus tidak melebihi:

1. $1/5$ jarak terkecil antara sisi cetakan.
2. $1/3$ ketebalan slab.
3. $3/4$ jarak bersih minimum antara tulangan atau kawat, bundel tulangan, atau tendon prategang, atau selongsong.

Jenis agregat kasar yang umum adalah:

- 1) Batu pecah alami: Bahan ini didapat dari cadas atau batu pecah alami yang digali.
- 2) Kerikil alami: Kerikil didapat dari proses alami, yaitu dari pengikisan tepi maupun dasar sungai oleh air sungai yang mengalir.
- 3) Agregat kasar buatan: Terutama berupa slag atau shale yang

biasa digunakan untuk beton berbobot ringan.

- 4) Agregat untuk pelindung nuklir dan berbobot berat: Agregat kasar yang diklasifikasi disini misalnya baja pecah, barit, magnetit dan limonit (Hizrian, 2017).

Tabel 2. Syarat - syarat gradasi agregat kasar.

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos Saringan (%)
50	100
38	95 - 100
19	35 - 70
9,5	10 - 30
4,75	0 - 5

Sumber: *Concrete Technology, AM.Nevile & J.J Brooks*

C. Semen

Semen adalah istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan campuran bahan organik dan anorganik yang menyusunnya. Secara umum, semen adalah material yang mempunyai sifat adhesif dan kohesif yang dapat mengikat butiran-butiran mineral menjadi satu kesatuan yang kompak. Berdasarkan Standar Eropa EN 197-1, semen dibagi menjadi lima jenis, yaitu:

- CEM I : Semen Portland
- CEM II : Semen Portland-komposit
- CEM III : Semen dari slag tanur tinggi (*blast furnace*)
- CEM IV : Semen pozzolanic
- CEM V : Semen komposit

Jenis semen yang paling banyak digunakan adalah semen tipe I, untuk membangun rumah. Adapun bahan utama campuran semen Portland adalah:

- 1) Trikalsium Silikat ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) atau C_3S .
- 2) Dikalsium Silikat ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) atau C_2S .
- 3) Trikalsium Aluminat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) atau C_3A .
- 4) Tetrakalsium Alumino Ferrid ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) atau C_4AF .
- 5) Gypsum ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

D. Air

Dalam beton, air berfungsi sebagai campuran untuk membuat bahan pengikat, yaitu melalui bereaksi dengan semen. Semakin encer beton akan semakin mudah dikerjakan, dan sebaliknya semakin sedikit kadar air maka beton akan semakin sukar dikerjakan. Sifat ini digambarkan oleh workabilitas. Workabilitas yang dimaksud disini adalah fluiditas dari adonan dimana menyatakan kemampuan adonan tersebut untuk diaduk secara kontinu, kemampuan untuk dituang ke dalam cetakan, dan kemampuan untuk mengisi ruang dalam cetakan. Proporsi air dinyatakan dalam rasio air-semen (*water- cement ratio*), yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air (kg) dibagi berat semen dalam campuran beton (Dina Noermalasari,2009).

E. Slag Nikel

ASTM C618 (1995) slag adalah produk non metal yang merupakan material berbentuk halus sampai besar dari hasil pembakaran yang didinginkan. Menurut Lewis (1982) keuntungan penggunaan limbah padat (slag) dalam campuran beton adalah sebagai berikut:

1. Manaikkan ratio antara kelenturan dan kuat tekan beton.
2. Mempertinggi kekuatan tekan beton karena kecenderungan melambatnya kenaikan kekuatan tekan.

Terak nikel dihasilkan dengan langkah-langkah berikut. Pertama adalah tahap Land Clearing, yaitu membersihkan lokasi tambang dari tumbuhan. Kedua, Stripping yaitu mengelupas lapisan tanah penutup. Lapisan tanah penutup tersebut dibawa ke penampungan untuk menambah lahan purnatambang. Lapisan penutup yang dibuka mempunyai kedalaman 5-10 meter bergantung kondisi tanah.



Gambar 3. Lokasi tambang Nikel Milik PT Vale Indonesia.

Setelah lapisan tanah penutup terbuka maka tampak bijih nikel dengan kadar sedang dan tinggi. Tahap ini disebut Ore Mining. Selanjutnya bijih nikel kadar tinggi diangkut ke screening station. Di tahap Screening Station, bijih nikel disaring sesuai ukuran yang diminta pabrik pengolahan. Selanjutnya tahap Stockpile, yaitu tempat penampungan sementara ore sekaligus mengurangi kadar air sebelum diolah ke pabrik. Setelah itu ore dari stockpile diangkut ke apron feeder, lalu dipindahkan lagi ke Dryer alias tempat penguapan sebagian kandungan air dari biji basah. Ore yang sudah kering ditampung di Dry Ore Storage. Tahap selanjutnya adalah Reduction Kiln, yaitu menghilangkan kandungan air bebas dan air kristal serta mereduksi nikel oksida menjadi nikel logam. Hasil akhir dari proses ini disebut kalsin yang bertemperatur 700 derajat celcius.

Kemudian masuk ke tahap Furnace, yaitu menghilangkan air yang tersisa, melebur kalsin menjadi nikel matte dan terak besi (slag). Tahap ini juga bertujuan memisahkan slag serta mengeluarkan matte. Temperatur matte sekitar 1.300 derajat celcius dan slag sekitar 1.500 derajat celcius. Lalu selanjutnya adalah Converter, pada tahap ini kadar matte ditingkatkan hingga 78%. Setelah itu disemprot dengan air bertekanan tinggi hingga berbentuk butir-butiran nikel matte disaring dan siap dikemas. Tahap terakhir yaitu Packaging, dimana Setiap kantong berisi tiga ton nikel matte.

Komposisi kimia yang terkandung pada terak nikel ditunjukkan pada Tabel 3. (Ridwan Banda, dkk., 2016).

Tabel 3. Komposisi Kimia Terak Nikel.

<u>Senyawa</u>	<u>Jumlah (%)</u>
Silika (SiO ₂)	41.47
Alumina (Al ₂ O ₃)	2.58
Ferro Oksida (Fe ₂ O ₃)	30.44
Magnesia (MgO)	22.75
Alkalis (Na ₂ O + K ₂ O)	0.68

Sumber: Ridwan Banda, dkk., 2016

F. Sifat Mekanik Beton

Dalam pembuatan beton harus diperhatikan sifat-sifat dari beton yang diinginkan. Sifat utama dan umum adalah sifat-sifat mekanis beton. Hal ini berpengaruh dalam perhitungan dan pembuatan campuran beton. Sifat-sifat mekanis beton dapat dikaitkan dengan dua kondisi, yakni beton segar dan beton yang sudah mengeras.

Perilaku mekanis beton keras tidak jauh dari kemampuan beton di dalam memikul beban pada struktur bangunan. Kinerja beton keras yang baik ditunjukkan oleh kuat tekan beton yang tinggi, kuat tarik yang lebih baik, perilaku yang lebih daktail, kedap air dan udara, ketahanan terhadap

sulfat dan klorida, penyusutan rendah dan keawetan jangka panjang.

F.1. Kuat Tekan

Kuat tekan beton adalah perbandingan besarnya beban maksimum dengan luas tampang silinder beton dengan satuan N/mm². Kuat tekan beton ditentukan oleh perbandingan semen, agregat halus, agregat kasar, air dan berbagai campuran lainnya. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama dalam menentukan kuat tekan beton.

Berdasarkan SNI 1974:2011, kuat tekan beton dihitung dengan membagi kuat tekan maksimum yang diterima benda uji selama pegujian dengan luas penampang melintang. Persamaan kuat tekan diperlihatkan pada persamaan 1.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

$f'c$ = Kuat tekan beton dengan benda uji silinder (Mpa)

P = Gaya tekan aksial (Newton, N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

Dalam penelitian ini, kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum $f'c$ dengan satuan N/mm² atau MPa (mega pascal).

Besarnya kuat tekan beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- a) Jenis semen dan kualitasnya, mempengaruhi kuat tekan rata-rata dan kuat batas beton.
- b) Jenis dan tekstur bidang permukaan agregat.
- c) Perawatan beton harus diperhatikan, sebab kehilangan kekuatan akibat pengeringan sebelum waktunya adalah sekitar 40%.

- d) Suhu mempengaruhi kecepatan pengerasan.
- e) Umur, pada keadaan normal kekuatan beton bertambah dengan umurnya.

Kecepatan bertambahnya kekuatan, bergantung pada jenis semen yang digunakan, misal semen dengan alumina yang tinggi akan menghasilkan beton dengan kuat hancur pada umur 24 jam sama dengan semen *portland* biasa umur 28 hari. Pengerasan berlangsung terus seiring dengan penambahan umur beton.

G. Korosi

Daya tahan dari perkuatan beton sebagian besar dikontrol oleh kemampuan beton untuk melindungi baja dari korosi. Perlindungan kimia disediakan oleh beton yang memiliki kadar alkali tinggi dan perlindungan fisik diberikan oleh selimut beton yang bertindak sebagai penghalang akses terhadap material agresif. Meskipun memiliki sifat proteksi, korosi dari baja tulangan telah menjadi penyebab terbesar terjadinya kegagalan pada struktur beton bertulang. Dalam struktur, penetrasi air laut ke dalam beton memungkinkan menjadi penyebab terjadinya karat (E. Guneyisi, dkk, 2007).

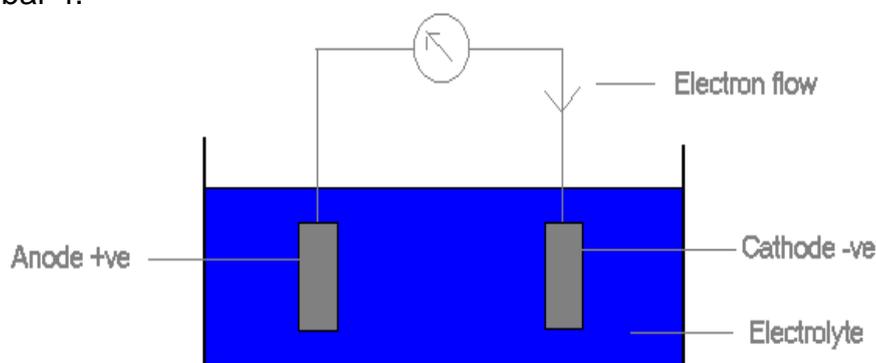
Korosi adalah degradasi atau penurunan mutu dari suatu material akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan. Peristiwa korosi tidak dapat dicegah, namun korosi dapat dikendalikan sehingga dapat diminimalisasi terjadinya kerugian-kerugian akibat terjadinya korosi. Kerugian-kerugian yang dapat ditimbulkan oleh korosi tidak hanya kerugian materi namun juga keselamatan manusia dan lingkungan.

Korosi dapat diklasifikasikan menjadi korosi basah (*wet corrosion*) dan

korosi kering (*dry corrosion*). Korosi basah terjadi pada lingkungan basah atau lembab, biasanya melibatkan larutan aqueous atau elektrolit. Sedangkan korosi kering terjadi di lingkungan udara yang kering atau temperatur tinggi.

Proses korosi pada korosi basa merupakan proses elektrokimia, yaitu suatu proses yang terdiri dari proses oksidasi pada anoda (reaksi anodik) dan proses reduksi pada katoda (reaksi katodik) melalui suatu larutan yang dapat menghantarkan arus listrik yaitu elektrolit. Elektrolit merupakan faktor utama yang mendukung terjadi dan terus berlangsungnya proses korosi, yang dapat berupa air laut, larutan asam, maupun aquades.

Gambar skematik suatu sel korosi sederhana dapat dilihat pada gambar 4.

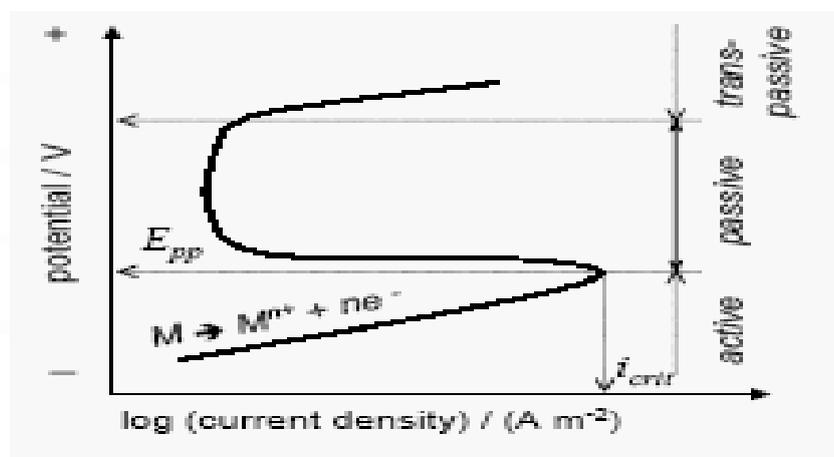


Gambar 4. Skematik sel korosi dalam suatu sistem sederhana

Pada sel korosi, elektron mengalir dari daerah dimana terjadi reaksi anodik menuju reaksi katodik. Ion mengalir melalui elektrolit untuk menyeimbangkan aliran dari elektron. Anoda mengalami korosi sedangkan katoda tidak. Selain itu, juga terdapat perbedaan potensial diantara anoda dan katoda (Dina Noermalasari, 2009).

G.1. Passivasi

Passivasi didefinisikan sebagai suatu kondisi terbentuknya lapisan film pada permukaan dibawah keadaan teroksidasi dengan terpolarisasi anodik yang tinggi sehingga melindungi logam dari reaksi selanjutnya. Lapisan pasif ini sangat tipis dan *fragile* pada pengukuran optikal, ketebalan lapisan transparan sekitar 1-10 nm.



Gambar 5. Skematik perilaku polarisasi aktif-pasif.

Gambar 5. memperlihatkan sifat logam dan paduan pada kondisi aktif-pasif. Pada potensial yang rendah, laju korosi yang terukur secara anodik tinggi dan akan terus meningkat (potensial korosi dalam keadaan aktif). Untuk kondisi di atas potensial pasif primer, E_{pp} , lapisan yang terbentuk akan stabil dan laju korosi turun hingga nilai yang sangat rendah dalam kondisi pasif. Penurunan laju korosi pada kondisi pasif hingga 10^6 kali lebih rendah dari laju maksimum yang tercapai saat kondisi aktif. Lapisan pasif dapat pecah pada potensial yang lebih tinggi sehingga laju reaksi anodik akan kembali meningkat, keadaan ini disebut *transpassive*.

Passivasi dari logam dapat dicapai melalui beberapa cara, yaitu:

- 1) Passivasi anodik, yaitu pemberian potensial anodik dengan teknik elektrokimia untuk menghasilkan pembentukan lapisan protektif (pasif).
- 2) *Autopassivation*, yaitu dengan penambahan unsur Cr dan logam lain ke dalam besi untuk menghasilkan stainless steel.
- 3) Passivasi kimia, yaitu pembentukan lapisan pasif dengan melakukan penambahan zat kimia kedalam lingkungan yang korosif seperti penambahan inhibitor.

G.2 Diagram Pourbaix

Diagram Pourbaix menggambarkan hubungan antara pH (absis) dengan potensial redoks (ordinat). Diagram ini berguna untuk mengetahui aspek termodinamika dari suatu reaksi elektrokimia. Dari diagram ini dapat diketahui kondisi logam apakah pasif, imun, ataupun aktif. Adapun kelebihan dan keterbatasan dari diagram Pourbaix adalah sebagai berikut:

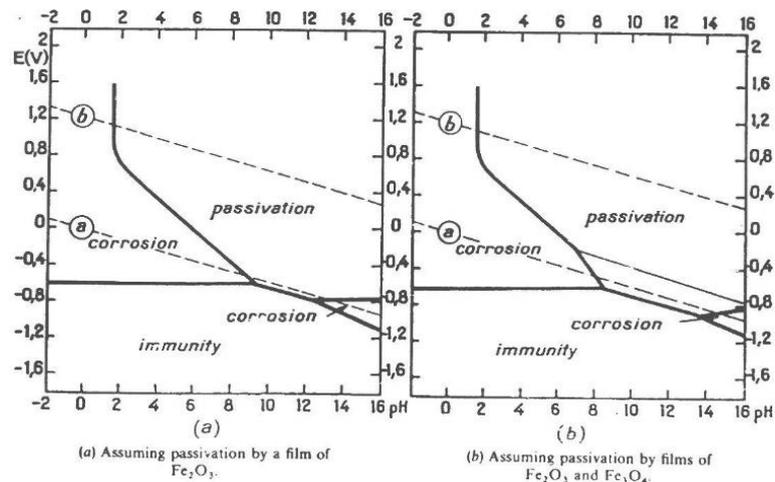
Kelebihan:

1. dapat digunakan untuk memprediksi terjadinya reaksi korosi, sehingga dapat dilakukan pencegahan.
2. mengetahui daerah-daerah aktif, pasif dan imun.
3. memprediksi penanggulangan korosi dengan mengatur beda potensial agar tidak terkorosi.

Keterbatasan:

1. hanya memprediksi apa yang dapat terjadi, dan bukan menyatakan

- apa yang akan terjadi.
2. tidak dapat menentukan kecepatan korosi.
 3. hanya dapat digunakan pada logam murni dengan larutan sederhana, bila paduan menggunakan superimposed.



Gambar 6. Kondisi teoritis dari korosi, imun, pasif dari besi

Dari gambar 6. Memberikan informasi yang berguna untuk mengontrol korosi dari logam murni pada lingkungan aqueous. Dengan mengubah potensial dan pH berada pada daerah imun dan pasif, korosi dapat dikontrol. Contohnya, dengan meningkatkan pH lingkungan menjadi sedikit basa, korosi dari besi dapat dikontrol. Dengan meningkatkan nilai potensial menjadi lebih positif dapat menurunkan kemungkinan terjadinya korosi karena pembentukan lapisan oksida pada permukaan logam.

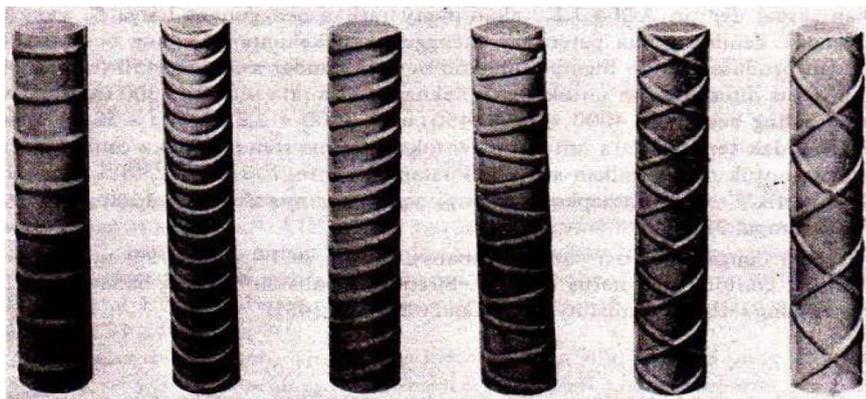
H. Baja Tulangan

Salah satu kelemahan beton terlihat dari kemampuan menahan tarik yang lemah. Dalam setiap konstruksi sipil, untuk dapat menahan beban tertentu tanpa mengalami keruntuhan di daerah tariknya, beton diberi perkuatan dengan tulangan baja.

Di dalam setiap struktur beton bertulang, harus diusahakan supaya tulangan baja dan beton dapat mengalami deformasi secara bersamaan, dengan maksud agar tidak terjadi penggelinciran diantara keduanya. Ada dua jenis baja tulangan yaitu, baja tulangan polos dan baja tulangan ulir (*deformed*). Baja tulangan ulir berfungsi untuk menambah lekatan antara beton dengan baja. Baja tulangan ulir yaitu batang tulangan baja yang permukaannya dikasarkan secara khusus, diberi sirip teratur dengan pola tertentu atau batang tulangan yang dipilih pada proses produksinya.

Tulangan penguat dapat terdiri dari batang tulangan, bahan yang terbuat dari anyaman kawat yang dilas, atau tali kawat. Untuk konstruksi biasa, digunakan batang tulangan (dinamakan tulangan berprofil) yang mempunyai penonjolan. Tonjolan demikian mencegah pergeseran dari tulangan relatif terhadap beton sekelilingnya. Tulangan berprofil ini tersedia di Amerika Serikat di dalam ukuran diameter nominal dari $\frac{3}{8}$ sampai $2\frac{1}{4}$ inci (9,5 sampai 57 mm).

Ukuran dari tulangan menurut ASTM (di dalam sistem satuan Inch-Pound) dinyatakan dengan nomor. Ukuran #3 sampai dengan #8, didasarkan atas dasar dalam seperdelapan inci dari diameter nominal. Tulangan #9 sampai dengan #11 adalah tulangan bulat yang dahulunya masing-masing mempunyai luas 1 inci^2 , $1\frac{1}{8} \text{ inci}^2$ dan $1\frac{1}{4} \text{ inci}^2$, dan batang #14 dan #18 adalah baja bulat yang mempunyai luas penampang yang masing-masing sama dengan $1\frac{1}{2}$ dan 2 inci^2 . Diameter nominal dari baja tulangan yang berprofil adalah ekuivalen dengan diameter dari batang polos yang mempunyai berat yang sama per kaki panjang.



Gambar 7. Baja – Baja Tulangan yang Berprofil

Baja tulangan beton terdiri dari batang, kawat, dan jaring kawat baja las. Yang terpenting dalam baja tulangan adalah sebagai berikut (Edward G. Nawy, 1998:14):

1. Modulus Young, E_s .
2. Kekuatan leleh, f_y .
3. Kekuatan batas, f_u .
4. Mutu baja yang ditentukan.
5. Ukuran atau diameter batang atau kawat.

Sifat mekanis baja tulangan beton dapat dilihat pada tabel 4. berdasarkan SNI 07-2052-2002:

Tabel 4. Sifat Mekanis Baja Tulangan Beton.

Kelas Baja Tulangan	Nomor Batang Uji	Uji Tarik			Uji Lengkung	
		Batas Ulur kgf/mm^2 (N/mm^2)	Kuat Tarik kgf/mm^2 (N/mm^2)	Regangan Min. %	Sudut Lengkung	Diameter Pelengkungan (mm)
BjTP 24	No. 2	Minimum 24 (235)	Minimum 39 (383)	20	180°	3 × d
	No. 3			24		
BjTP 30	No. 2	Minimum 24 (294)	Minimum 45 (441)	18	180°	$d \leq 16 = 3 \times d$
	No. 3			20		$d > 16 = 4 \times d$
BjTS 30	No. 2	Minimum 24 (294)	Minimum 45 (441)	16	180°	$d \leq 16 = 3 \times d$
	No. 3			18		

Kelas Baja Tulangan	Nomor Batang Uji	Uji Tarik			Uji Lengkung	
		Batas Ulur kgf/mm ² (N/mm ²)	Kuat Tarik kgf/mm ² (N/mm ²)	Regangan Min. %	Sudut Lengkung	Diameter Pelengkungan (mm)
BjTS 35	No. 2	Minimum 24 (343)	Minimum 50 (491)	18	180°	$d > 16 = 4 \times d$
	No. 3			20		$d \leq 16 = 3 \times d$ $16 > d \geq 40 = d \times 4$ $d \geq 50 = 5 \times d$
BjTS 40	No. 2	Minimum 24 (392)	Minimum 57 (559)	16	180°	$5 \times d$
	No. 3			18		
BjTS 50	No. 2	Minimum 24 (491)	Minimum 63 (618)	12	90°	$d \leq 25 = 5 \times d$
	No. 3			14		$d > 25 = 6 \times d$

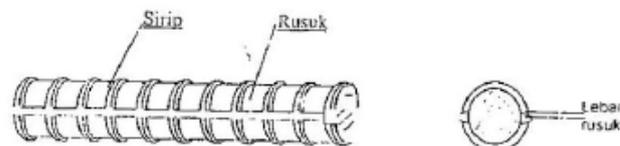
CATATAN 1 Hasil uji Lengkung tidak boleh retak pada sisi luar lengkungan

CATATAN 2 Untuk baja tulangan sirip \geq S 30 nilai regangan dikurangi 2%. Untuk baja tulangan sirip S 40 dan S 50 dikurangi 4% dari pada nilai tabel 6.

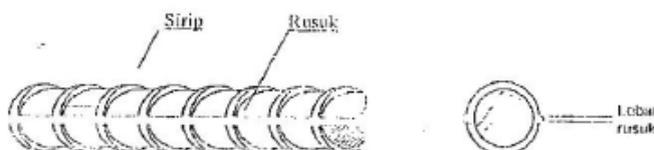
CATATAN 3 $1 \text{ N/mm}^2 = 981 \text{ kgf/mm}^2$

Sumber : SNI 07-2052-2002

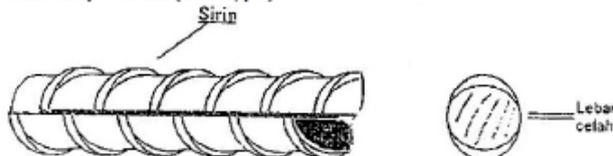
a) Jenis bambu (Bamboo type)



b) Jenis tulangan ikan (Fish bone type)



c) Jenis sirip curam (Tor type)



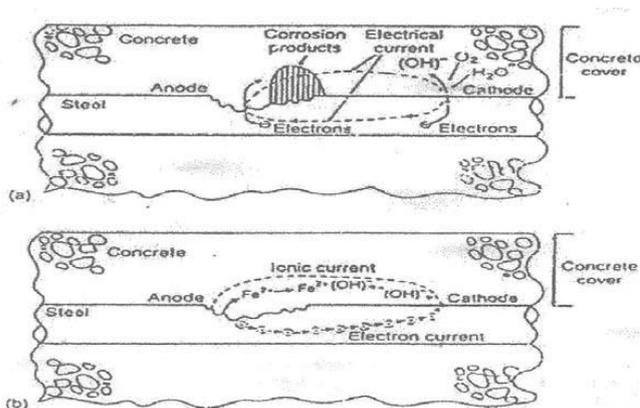
Gambar 8. Bentuk baja tulangan sirip beton (SNI 07-2052-2002).

Selain baja polos juga dapat digunakan baja ulir (deformasi), yaitu batang tulangan baja yang permukaannya dikasarkan secara khusus, diberi

sirip teratur dengan pola tertentu atau batang tulangan yang dipilin pada proses produksinya. Kekuatan *bending* dan *fatigue* tulangan tergantung pada keberadaan geometri atau bentuk ulir tulangan. Efek takikkan (*notch effect*) ulir tulangan akan mereduksi kekuatan *bending* dan *fatigue* tulangan (Afifah Dina, 2017).

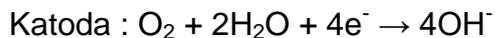
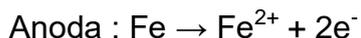
I. Korosi Baja Tulangan Dalam Beton

Korosi baja tulangan dalam beton merupakan proses elektrokimia yang melibatkan pasangan reaksi kimia dan aliran arus listrik. Proses korosi dimulai saat atom-atom dari anoda terurai menjadi ion-ion sehingga anoda menjadi negatif dari lingkungan sekitarnya. Elektron yang dihasilkan dari anoda mengalir menuju katoda melalui penghantar elektrolit. Proses korosi ini akan terus berkelanjutan apabila reaksi anoda dan katoda terus berlangsung, dan dalam suatu penghantar elektrolit.

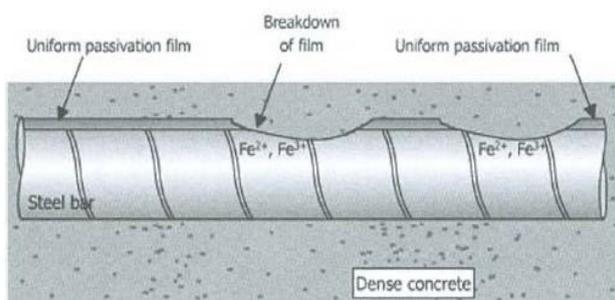


Gambar 9. Proses korosi pada permukaan baja.

Gambar 9. memperlihatkan reaksi elektrokimia yang terjadi di anoda dan katoda saat logam besi terkorosi. Reaksi yang terjadi adalah:



Perpindahan ion-ion ferro (Fe^{2+}) dan ion-ion hidroksida (OH^{-}) akan bereaksi membentuk produk korosi $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Karat dapat terbentuk pada baja tulangan dalam beton jika lapisan pasif pada baja rusak seperti yang Karat yang terbentuk mencapai 3 hingga 9 kali volume baja tulangan yang terkorosi. Akibatnya terbentuk tegangan tarik setempat yang memicu terbentuknya retak dan lebih lanjut akan menyebabkan delaminasi dan pengelupasan selimut beton.



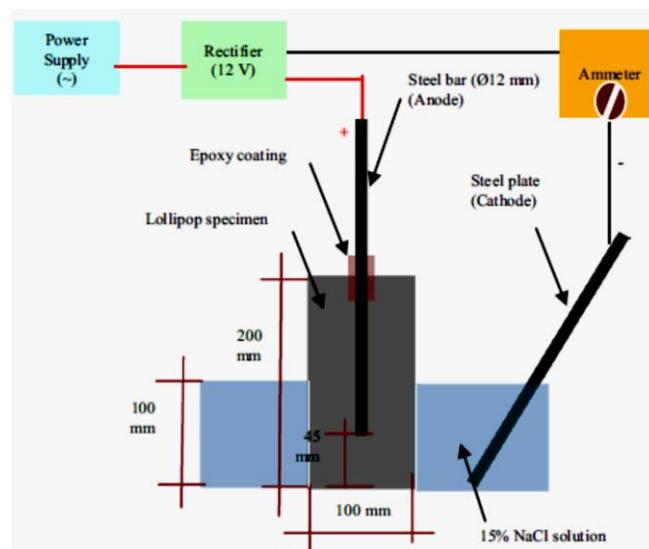
Gambar 10. Lapisan pasif baja tulangan dalam beton rusak.

J. Akselerasi korosi

Tujuan penginduksian korosi pada baja tulangan adalah untuk mensimulasikan bagaimana korosi dapat merusak beton. Proses korosi dimulai dengan memberikan energy anodic yang konstan sebesar 40 V. Pengujian percepatan korosi juga pernah diteliti oleh peneliti lain. Pada metode ini, sebuah energi potensial positif yang konstan diberikan pada tulangan yang tertanam pada beton dan arus dari baja tulangan untuk melawan electrode dihitung secara berkala (Afifah Dina,2017).

DC power digunakan pada proses akselerasi korosi untuk menyuplai arus konstan 10 Volt ke permukaan tulangan. Positif terminal (+) power supply tersambung dengan tulangan dan negatif terminal (-) ke *stainlees plate* sebagai pengantar arus ke permukaan tulangan. Media pengujian dilakukan pada plastik kontainer dengan larutan 3% NaCl.

Pengujian akselerasi korosi dilakukan untuk membandingkan korosi dari beton yang menggunakan bahan pengikat. Penelitian yang mirip dengan sedikit perbedaan telah dilakukan sebelumnya oleh peneliti yang lain. Dalam studi tersebut, spesimen direndam kedalam larutan NaCl 3% hingga setengah dari benda uji silinder dan tulangan (elektroda yang bekerja) terhubung dengan terminal positif pada sumber *DC Power* sedangkan terminal negatif terhubung pada pelat baja (*counter electrode*) ditempatkan dekat spesimen beton yang direndam. Proses korosi dimulai dengan memasang anodik potensial yang relatif tinggi yaitu 12 V untuk mempercepat korosi.



Gambar 11. Skema penelitian akselerasi korosi

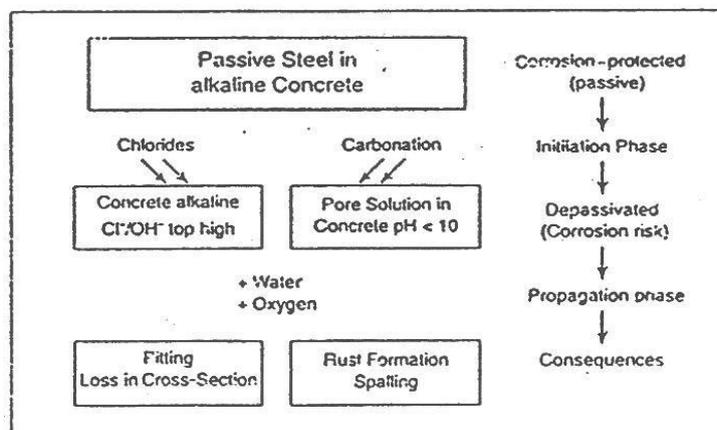
(Swaidani dan Aliyan, 2015).

Gambar 11. menunjukkan skema representasi penelitian akselerasi korosi. Spesimen dipantau secara berkala untuk melihat berapa lama waktu yang dibutuhkan sampai retak akibat korosi muncul di permukaan spesimen (Swaidani dan Aliyan, 2015).

K. Faktor Penyebab Korosi pada Baja Tulangan dalam Beton

K.1. Depasivasi

Dalam larutan pori basa yang tinggi pada beton yang terbentuk selama proses hidrasi semen, terbentuk lapisan oksida tipis (*passive film*) yang melindungi baja tulangan dari korosi. Namun demikian lapisan tersebut dapat pecah disebabkan oleh penurunan nilai pH akibat penguraian karbon dioksida dan sulfida dari atmosfer dan penetrasi ion klorida dari lingkungan seperti yang terlihat pada Gambar 12.



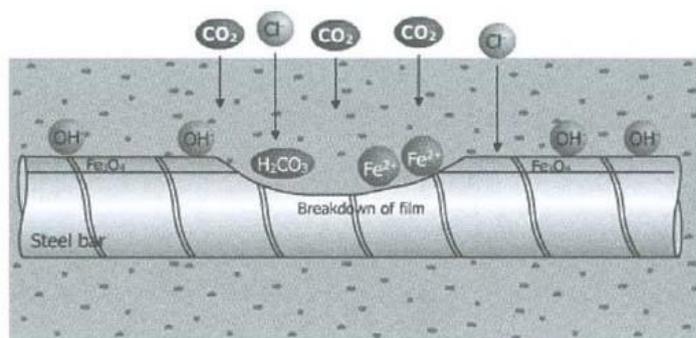
Gambar 12. Degradasi korosi baja tulangan dalam beton.

K.2 Penguraian CO₂ (Karbonisasi)

Molekul-molekul gas karbon dioksida yang terdapat pada atmosfer dapat berpenetrasi ke dalam beton lalu bereaksi dengan senyawa-senyawa alkali hidroksida yang berada dalam larutan pori selimut beton, dengan reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

1. $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (asam karbonat)
2. $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ (penurunan pH)
3. $(3) \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Pembentukan kalsium karbonat disertai penurunan kandungan air dan peningkatan berat beton, menyebabkan retak di permukaan. Gambar 13 memperlihatkan efek dari proses karbonasi dalam beton. Proses karbonasi menyebabkan penurunan alkalinitas dikarenakan penurunan pH. Hal ini dapat menyebabkan baja berpindah dari daerah pasif menjadi daerah aktif pada Diagram Pourbaix.



Gambar 13. Efek karbonisasi pada korosi baja tulangan dalam beton.

K.3 Serangan Sulfat

Beton yang kontak dengan air dalam tanah liat dapat terserang garam sulfat dari kalsium, magnesium, dan sodium. Garam sulfat juga terdapat pada air laut dan air payau. Reaksi utama yang terjadi adalah sebagai berikut:

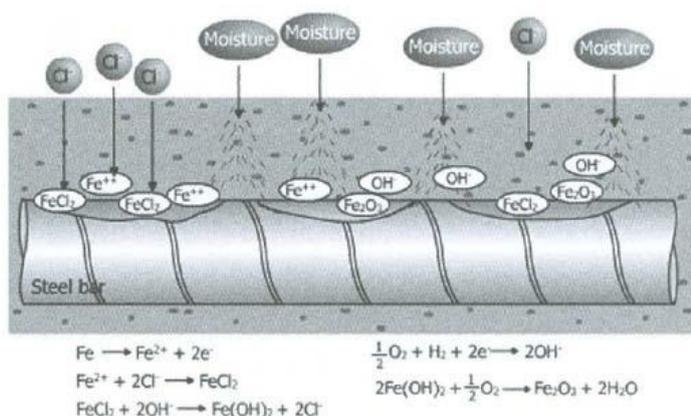
1. $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O}$
(Gypsum)
2. $2(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}) + 3(\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}) \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$

3. (Calcium sulfoaluminate) + 2Al(OH)₃ + 6NaOH + 17H₂O

Dua produk dari reaksi, gypsum dan ettringate (calcium sulfoaluminate) memiliki volum lebih besar dari senyawa yang digantikan, Karenanya, serangan sulfat menyebabkan ekspansi dalam volum dan kerusakan pada beton.

K.4 Efek Ion Klorida

Ion klorida dapat merusak lapisan pasif dan menyebabkan korosi pitting pada baja. Pitting merupakan reaksi autokatalitik yang berkelanjutan hingga terbentuk lubang pada baja tulangan dalam beton. Klorida bereaksi dengan ferit membentuk suatu paduan kompleks FeCl₂. Proses korosi sumuran ini dapat dilihat pada Gambar 14. Sumuran mulai terbentuk pada permukaan logam yang tidak seragam yaitu bagian logam yang tidak diberikan inhibitor, coating yang tergores, atau adanya endapan seperti slag, scale, debu dan pasir.

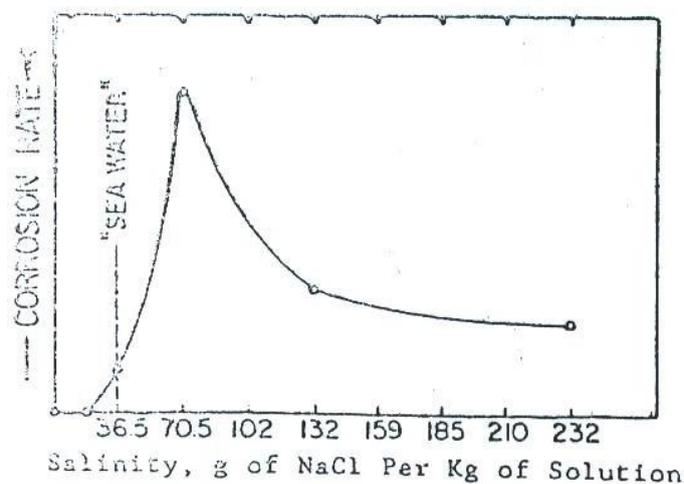


Gambar 14. Korosi yang disebabkan penetrasi ion klorida dalam beton.

Kehadiran ion klorida dalam beton menghasilkan dua efek, yaitu (1) meningkatkan konduktivitas dari elektrolit; (2) lapisan proteksi oksida dapat rusak karena pembentukan besi klorida yang mudah larut. Dua efek ini

memudahkan pelarutan dari ion logam. Ion klorida berasal dari komponen campuran beton, kalsium klorida yang ditambahkan sebanyak 2% dari berat semen. Selain itu, agregat yang berpori, yang terekspos air laut dapat menjadi sumber klorida.

Pengaruh ion klorida dari garam natrium klorida terhadap laju korosi dikemukakan oleh Griffin dan Henry seperti yang terlihat pada Gambar 15. Laju korosi meningkat sejalan dengan peningkatan konsentrasi garam sampai mencapai batas maksimum. Kemudian laju korosi akan berkurang walaupun konsentrasi garam ditingkatkan. Perubahan ini menghasilkan suatu hubungan antara korosi dan konsentrasi garam yang dapat mengurangi kelarutan serta difusi oksigen dan dampak keberadaannya terhadap proses korosi.



Gambar 15. Pengaruh konsentrasi garam terhadap laju korosi.

Produk korosi memiliki volume yang lebih besar dari baja sehingga dapat menyebabkan tegangan tarik dalam beton. Jika tegangan tarik produk korosi lebih besar dari beton maka akan terjadi retak pada beton. Hal ini akan mengakibatkan terjadi peningkatan difusi ion klorida dan

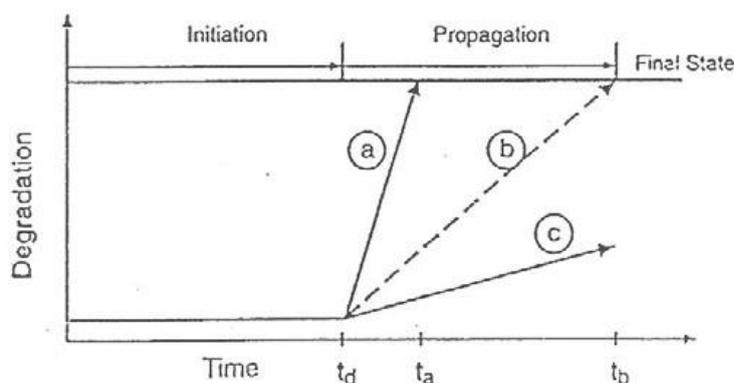
karbon dioksida pada tempat terjadinya retak di beton. Timbulnya keretakan ini akan mengakibatkan percepatan kerusakan (*spalling*) pada struktur baja tulangan dalam beton.

K.5 Efek Oksigen

Oksigen merupakan syarat terjadinya korosi. Jika tidak ada oksigen, maka korosi tidak dapat terjadi. Udara dapat berdifusi ke dalam beton. Air yang kontak dengan udara menjadi jenuh dengan oksigen dan total kandungan oksigen tergantung dari total padatan yang terlarut dan kelarutan oksigen, Kelarutan oksigen merupakan fungsi dari temperatur, tekanan, dan kandungan garam yang terlarut. Oksigen dapat menyebabkan terbentuknya perbedaan sel aerasi yang meningkatkan korosi pada permukaan baja.

K.5.1 Mekanisme korosi baja tulangan dalam beton

Proses degradasi yang terjadi pada material baja tulangan dalam beton dibagi menjadi 2 tahapan, yaitu tahap inisiasi dan tahap propagasi. Gambar 16 adalah perkembangan korosi baja terhadap waktu t_d , waktu depassivasi t_a , waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan akhir t_b , dengan laju korosi a, b, c dan kenaikan laju korosi ($a > b > c$).



Gambar 16. Model korosi untuk baja tulangan dalam beton.

(1) Tahap inisiasi

Pada tahap ini ion atau zat agresif yang mempasivasi baja berpenetrasi dari permukaan ke material ruah dalam beton. Tahap ini berlangsung hingga baja mengalami depasivasi (t_d). Lamanya tahap ini dipengaruhi oleh ketebalan lapisan beton, laju penetrasi dan konsentrasi ion-ion agresif yang dapat mendepasivasi baja. Laju penetrasi bergantung pada kualitas dari selimut beton (porositas dan permeabilitas) dan pada kondisi *microclimatic* (*wetting dan drying*) pada permukaan beton.

(2) Tahap propagasi

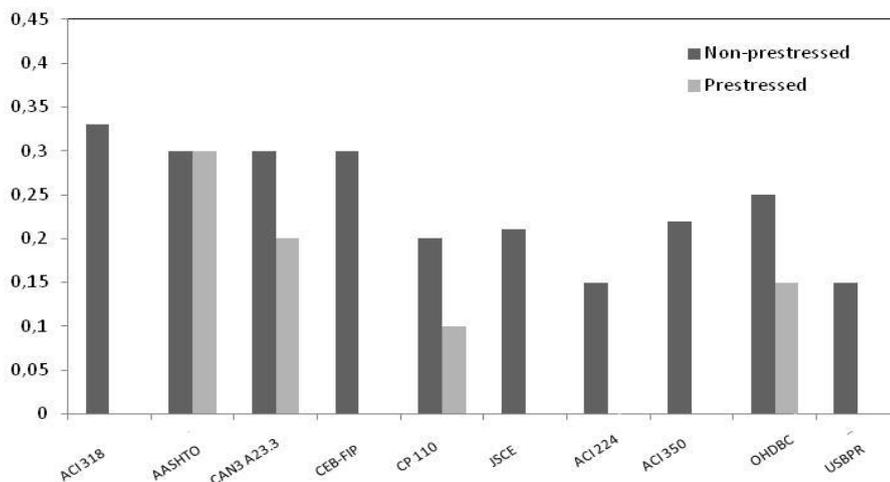
Ketika baja tedepasivasi karena ion klorida atau karbonasi, maka korosi dapat terjadi dengan hadirnya oksigen dan kelembaban lingkungan. Waktu untuk propagasi korosi diberikan oleh derajat kerusakan yang dapat diterima (*loss in cross section, spalling*) dan oleh laju korosi. Laju korosi menentukan waktu untuk mencapai keadaan akhir dari struktur dan laju korosi bervariasi tergantung pada temperatur, kelembaban, dan sebagainya. (Dina Noermalasari,2009)

L. Keretakan Beton Akibat Korosi

Penyebab keretakan terhadap durabilitas dari struktur beton adalah akibat fungsi kompleks dari kualitas beton yang terdiri dari kondisi lembab, lebar retak, tipe, kedalaman, frekuensi dan orientasi perkuatan dan penanganan retak (ACI 222 R-01 American Concrete Institute (ACI) 1996). Penyebab keretakan dan lebar retak tulangan pada beton merupakan hal yang menimbulkan banyak perdebatan. Sebelumnya, penelitian dan diskusi telah dikhususkan untuk topik ini tanpa sampai pada kesimpulan. Secara

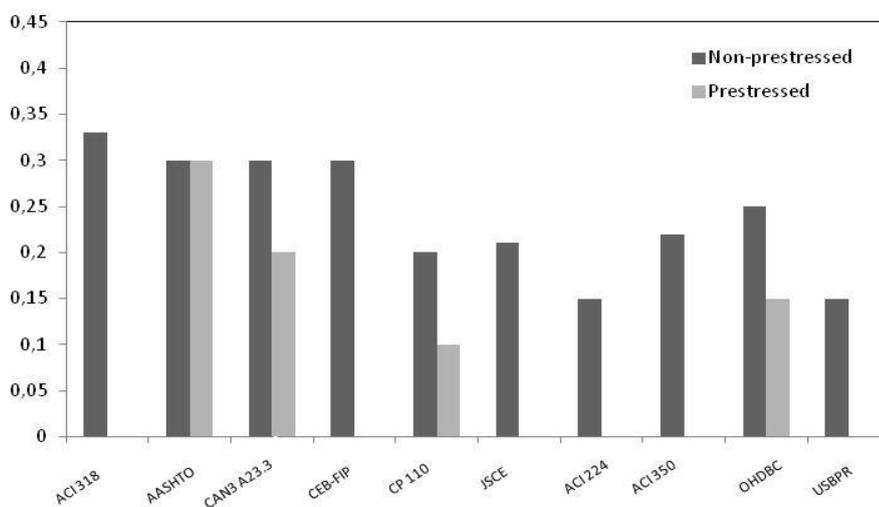
umum, ada dua sudut pandang:

1. Keretakan mengurangi masa kerja dari struktur dengan akses yang lebih cepat yaitu akses kelembaban, ion klorida dan oksigen untuk mencapai kekuatan, sehingga mempercepat proses pengerasan.
2. Keretakan akan mengakselerasi proses korosi, karena korosi pun akan dilokalisasi ke daerah yang hancur.



Gambar 17. Perbandingan lebar retak yang diizinkan (*Severe Exposure*).

(Sumber: *State of The Art Report About Durability of Post Tensioned Bridge Substructures, J.S West et al*).



Gambar 18. Perbandingan lebar retak yang diizinkan (*Mild Exposure*).

(Sumber: *State of The Art Report About Durability of Post Tensioned Bridge Substructures, J.S West et al*).

Sebagai perbandingan, lebar retak yang diizinkan ditetapkan dengan melihat desain yang ditunjukkan dalam Gambar 17 untuk lingkungan dengan kondisi parah dan Gambar 18 untuk lingkungan dengan kondisi ringan.

M. Peranan Slag Nikel Pada Laju Korosi Tulangan

penelitian ini dilakukan dengan pelapisan Slag Nikel untuk menurunkan laju korosi. Data laju korosi pada penelitian ini didapat dari pengujian menggunakan alat DC power dan Digital Voltmeter . Hasilnya dapat dilihat dimana semakin besar rapat arus maka laju korosi semakin kecil. Nilai rapat arus dari awal sudah ditentukan (setting) terlebih dahulu , menurunnya nilai laju korosi disebabkan oleh ketebalan lapisan nikel yang terbentuk. pengaruh ketebalan lapisan nikel terhadap laju korosi, yaitu semakin tebal lapisan nikel maka laju korosi semakin kecil. Selain dipengaruhi oleh ketebalan lapisan nikel, menurunnya laju korosi juga dipengaruhi oleh rata-rata ukuran butir lapisan nikel yaitu semakin kecil ukuran butir lapisan nikel maka nilai laju korosinya semakin kecil. peningkatan rapat arus berpotensi tinggi mengurangi energi inti proses yang kemudian meningkatkan nukleasi. Jadi, rapat arus berpengaruh terhadap laju korosi. Hal ini disebabkan oleh ukuran butir dan ketebalan lapisan nikel yang terbentuk, semakin besar rapat arus maka ukuran butir semakin kecil. Hal ini dikarenakan kuatnya polarisasi katoda pada saat pembentukan butir lapisan. Berdasarkan teori elektro deposisi, polarisasi katoda yang kuat menyebabkan cepatnya laju nukleasi kristal dan peningkatan jumlah butir sehingga yang terbentuk ukurannya lebih kecil. (Metalurgi, 2017)